

第4章 正弦波振荡器

4.1 本章重点和难点

- (1) 振荡器的种类及应用;
- (2) 三点式振荡器;
- (3) 改进型电容三点式振荡器,即克拉泼电路和西勒电路;
- (4) 振荡器的频率稳定问题;
- (5) 压电效应,石英晶体谐振器,石英晶体振荡器电路。

4.2 内容要点

4.2.1 概述

振荡器是指在没有外加信号作用下的一种自动将直流电源的能量变换为一定波形的交变振荡能量的装置。

正弦波振荡器在电子技术领域里有着广泛的应用。在信息传输系统的各种发射机中,就是把主振荡器(振荡器)所产生的载波,经过放大、调制而把信息发射出去的。在超外差式的各种接收机中,是由振荡器产生一个“本地振荡”信号,送入混频器,才能将高频信号变成中频信号。在研制、调测各类电子设备时,常常需要信号源和各种测量仪器,在这些仪器中大多包含有振荡器。例如高频信号发生器、音频信号发生器、Q值以及各种数字式测量仪表等。此外,在工业生产中的高频加热、超声焊接以及电子医疗器械也都广泛应用振荡器。

振荡器的种类很多。从所采用的分析方法和振荡器的特性来看,可以把振荡器分为“反馈式振荡器”和“负阻式振荡器”两大类,我们只讨论反馈式振荡器。根据振荡器所产生的波形,又可以把振荡器分为正弦波振荡器与非正弦波振荡器。本书只介绍正弦波振荡器。

4.2.2 反馈型正弦波自激振荡器基本原理

本节以互感反馈振荡器为例,分析反馈型正弦波自激振荡器的基本原理、振荡产生的条件、建立和稳定过程。归纳本节分析的问题,可

把振荡条件列于表 4-1 中。

表 4-1 振荡条件

| | | |
|------|--------------------|--|
| 平衡条件 | $\dot{K}\dot{F}=1$ | 振幅平衡条件 $KF=1$ |
| | | 相位平衡条件 $\sum \varphi=n \times 360^\circ$ |
| 起振条件 | $\dot{K}\dot{F}>1$ | |
| 稳定条件 | 振幅稳定条件 | 在平衡点 $K \sim u$ 曲线斜率为负 $\left. \frac{dK}{du} \right _{K=\frac{1}{F}} < 0$ |
| | 相位稳定条件 | 在平衡点 $\varphi \sim f$ 曲线斜率为负 $\left. \frac{d\varphi}{df} \right _{f=f_0} < 0$ |

4.2.3 三点式 LC 振荡器

1. 组成原理

LC 回路引出三个端点,分别同晶体管的三个电极相连的振荡器,称三点式振荡器。它分为电容三点式和电感三点式。不论是电容三点式还是电感三点式电路都有这样一个规律:发射极、基极和发射极、集电极间回路元件的电抗性质相同(同为电感或电容);基极、集电极间回路元件的电抗性质同上两元件相反。总结为一句话为:射同集(基)反——与射极相连的元件电抗性质相同,与集电极、基极相连的元件的电抗性质相反。该规律对于三点式电路有普遍意义。图 4-1 即为三点式电路相位平衡条件准则:

- (1) 与发射极相连的两电抗 X_{ce} 和 X_{be} 性质相同;
- (2) X_{cb} 和 X_{ce} , X_{be} 性质相反。

对于场效应管振荡器,将源极对应于发射极,栅极对应于基极,漏极对应于集电极即可。

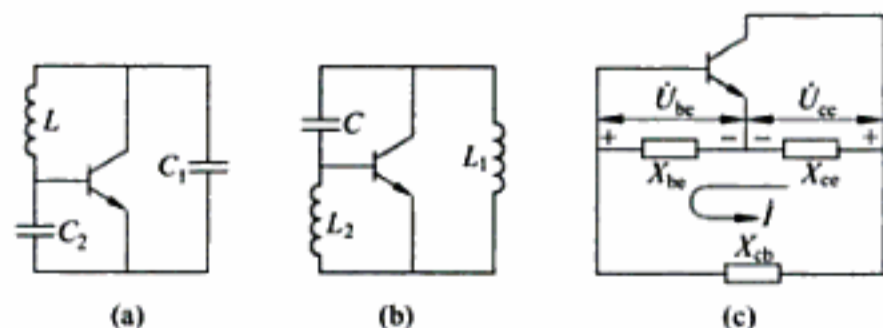


图 4-1 三点线路相位条件判别

2. 电容三点式振荡器

图 4-2 示出电容反馈三点线路,也叫“考毕兹”振荡电路。图中, L, C_1, C_2 组成振荡器

回路,作为晶体管放大器的负载阻抗,反馈信号从 C_2 两端取得,送回放大器输入端。扼流圈 ZL 的作用是为了避免高频信号被旁路,而且为晶体管集电极构成直流通路。也可用 R_c 代替 ZL ,但 R_c 将引入损耗,使回路有载 Q 值下降,所以 R_c 值不能过小。

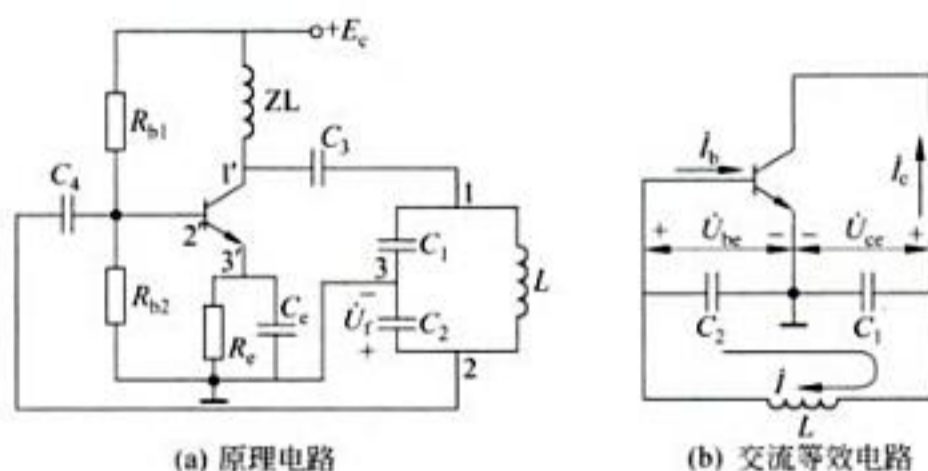


图 4-2 电容三点式振荡器

由于它是利用电容 C_2 将谐振回路的一部分电压反馈到基极上,而且也是将 LC 谐振回路的三个端点分别与晶体管三个电极相连,所以这种电路又叫电容反馈三点式振荡器。这种电路满足“射同集(基)反”的相位平衡条件准则。

电容三点式振荡器的起振条件:

$$\beta > \frac{R_i}{F} \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{n^2 R_o} \right) + F$$

如果 $n^2 R_o \gg R_s$, 则回路损耗可以忽略,得

$$\beta > \frac{R_i}{R_s} \frac{1}{F} + F \quad (4-1)$$

3. 电感反馈三点电路(哈特莱电路)

图 4-3 为电感反馈三点电路,该电路是以 LC 谐振回路为集电极负载,并利用电感 L_2 将谐振电压反馈到基极上,故称为电感反馈式振荡器,也叫“哈特莱”振荡器。

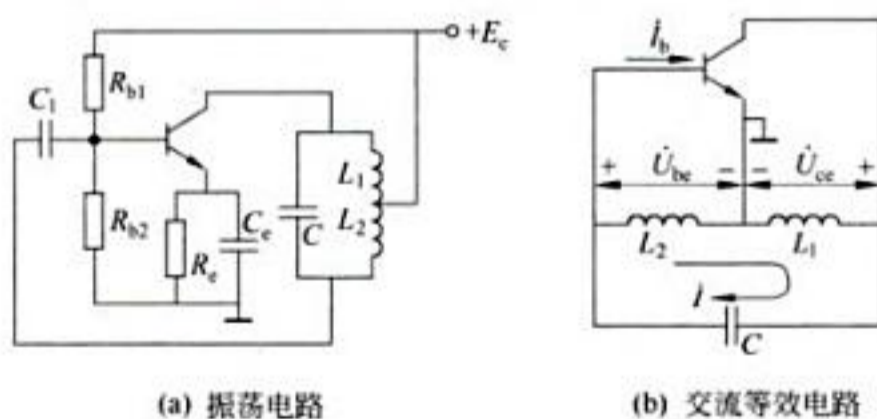


图 4-3 电感三点式振荡器

这种电路同样满足射同集(基)反的相位平衡条件准则。

与电容反馈三点振荡相似的起振条件的公式为

$$\beta > \frac{R_i}{F} \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{n^2 R_o} \right) + F \quad (4-2)$$

4.2.4 改进型电容三点式电路

前面讨论的三种 LC 振荡器的振荡频率不仅与谐振回路的 LC 元件的值有关,而且还与晶体管的输入电容 C_i 以及输出电容 C_o 有关。当工作环境改变或更换管子时,振荡频率及其稳定性就要受到影响。例如,对于电容三点式电路,晶体管的电容 C_o, C_i 分别同回路电容 C_1, C_2 并联,图 4-2 振荡频率可以近似写成:

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L \frac{(C_1 + C_o)(C_2 + C_i)}{C_1 + C_2 + C_o + C_i}}} \quad (4-3)$$

如何减小 C_i, C_o 的影响,以提高频率稳定度呢? 表面看来,加大回路电容 C_1 与 C_2 的电容量,可以减弱由于 C_i, C_o 的变化对振荡频率的影响。但是这只适用于频率不太高、 C_1 和 C_2 较大的情况。当频率较高时,过分地增加 C_1 和 C_2 ,必然减小 L 的值(维持振荡频率不变),这就导致回路的 Q 值下降,振荡幅度下降,甚至会使振荡器停振。这就有待于改进。

1. 串联改进型电容反馈三点线路(克拉泼电路)

串联改进型电容反馈三点线路表示于图 4-4(a)中,它的交流等效电路如图 4-4(b)所示。

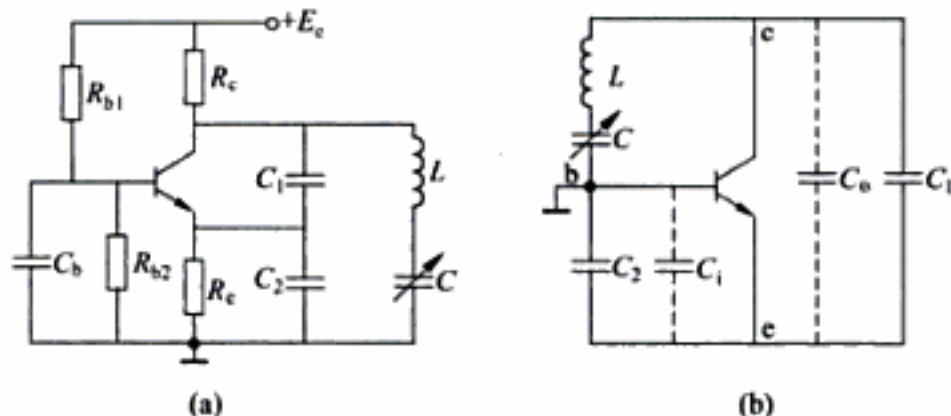


图 4-4 串联改进型电容反馈三点线路

它的特点是把基本型的电容反馈三点线路集电极—基极支路的电感改用 LC 串联回路代替,这正是它的名称的由来——串联改进型电容反馈三点线路,又叫“克拉泼”电路。

电路接成共基极, C_b 对交流短路,故基极接地。这种振荡器的频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}} \quad (4-4)$$

其中 C_Σ 由下式决定:

$$\frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1 + C_o} + \frac{1}{C_2 + C_i} \quad (4-5)$$

选 $C_1 \gg C, C_2 \gg C$ 时, $C_\Sigma \approx C$, 振荡频率 ω_0 可近似写成

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4-6)$$

这就使 C_0 和 C_1 几乎与 ω_0 值无关, 它们的变动对振荡频率的稳定性就没有什么影响了, 提高了频率稳定度。

使式(4-6)成立的条件是 C_1 和 C_2 都要选得比较大。但不是 C_1, C_2 愈大愈好。回路谐振电阻 R 表示在图 4-5 中, 折合到晶体管 c—e 端的电阻 R' 经推导可得

$$R' = n^2 R \approx \frac{\omega_0 L Q}{\omega_0^4 L^2 C_1^2} = \frac{1}{\omega_0^3} \frac{Q}{LC_1^2} \quad (4-7)$$

由式(4-7)看出, C_1, C_2 过大时, R' 变得很小, 放大器电压增益降低, 振幅下降。还可看出, R' 同振荡器 ω_0 的三次方成反比, 当减小 C 以提高频率 ω_0 时, R' 的值急剧下降, 振荡幅度显著下降, 甚至会停振。另外, 用作频率可调的振荡器时, 振荡幅度随频率增加而下降, 在波段范围内幅度不平稳, 因此, 频率覆盖系数(在频率可调的振荡器中, 高端频率和低端频率之比称为频率覆盖系数)不大, 约为 1.2~1.3。

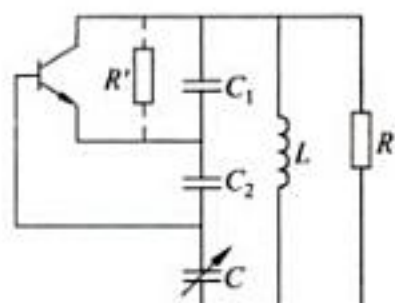


图 4-5 谐振电阻 R 折合到晶体管输出端

2. 并联改进型电容反馈三点线路(西勒电路)

电路如图 4-6(a)所示。它的交流等效电路如图 4-6(b)所示。

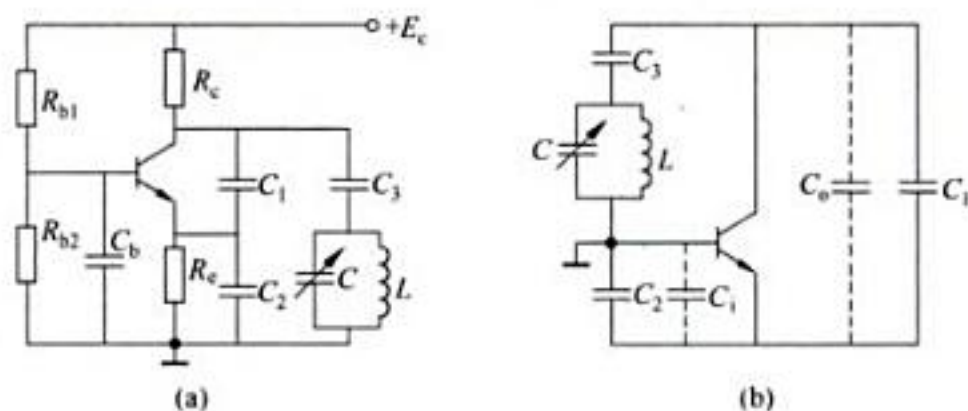


图 4-6 并联改进型电容反馈三点线路

此电路除了采用两个容量较大的 C_1, C_2 外, 主要特点是把基本型的电容反馈线路集电极—基极支路改用 LC 并联回路再与 C_3 串联, 所以叫并联改进型, 也叫“西勒”电路。

下面对该电路的有关参数进行分析。

回路谐振频率 ω_0 为

$$\omega_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma}}}$$

其中, 回路总电容 C_{Σ} 为

$$C_{\Sigma} = C + \frac{1}{\frac{1}{C_1 + C_0} + \frac{1}{C_2 + C_1} + \frac{1}{C_3}} \quad (4-8)$$

折合到晶体管输出端的谐振电阻 R' 为

$$R' = n^2 R$$

其中 n 为分压比,由图 4-7 可推得

$$n = 1 / \left[1 + \frac{(C_1 + C_0)(C_3 + C_2 + C_1)}{C_3(C_2 + C_1)} \right] \quad (4-9)$$

由式(4-9)可知, n 和 C 无关,当调节 C 来改变振荡频率时, n 不变。

如果把 R 折合到 c—e 端, R' 的表示式仍为

$$R' = n^2 R = n^2 Q \omega_0 L \quad (4-10)$$

当改变 C 时, n, L, Q 都是常数,则 R' 仅随 ω_0 一次方增长,易于起振,振荡幅度增加,使在波段范围内幅度比较平稳,频率覆盖系数较大,可达 1.6~1.8。另外,西勒电路频率稳定性好,振荡频率可以较高。因此,在短波、超短波通信机及电视接收机等高频设备中得到广泛应用。

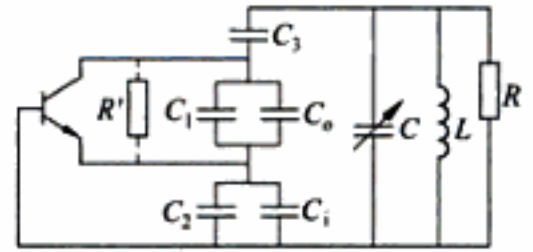


图 4-7 谐振电阻折合到晶体管输出端(西勒振荡器)

3. 几种三点线路振荡器的比较

表 4-2 给出了四种三点线路的性能比较。

表 4-2 三点式振荡电路的性能比较

| 名称 | 电容反馈 (考毕兹) | 电感反馈 (哈特莱) | 电容串联改进 (克拉泼) | 电容并联改进 (西勒) |
|----------------|--|---|--|--|
| 振荡频率 f_0 近似式 | $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ | $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ $L = L_1 + L_2 + 2M$ | $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$ $\frac{1}{C_\Sigma} \approx \frac{1}{C}$ | $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$ $C_\Sigma \approx C + C_1$ |
| 波形 | 好 | 差 | 好 | 好 |
| 反馈系数 | $\frac{C_1}{C_2}$ | $\frac{L_2 + M}{L_1 + M}$ 或 $\frac{N_2}{N_1}$ | $\frac{C_1}{C_2}$ | $\frac{C_1}{C_2}$ |
| 作可变 f_0 振荡器 | 不方便 | 可以 | 方便,但幅度不稳 | 方便,幅度平稳 |
| 频率稳定度 | 差 | 差 | 好 | 好 |
| 最高振荡频率 | 几百至几千兆赫, 但频率稳定度下降 | 几十兆赫 | 百兆赫但幅度下降 | 百兆赫至千兆赫 |

4.2.5 振荡器的频率稳定问题

振荡器的频率稳定是一个十分重要的问题。例如,通信系统的频率不稳,就会漏失信号而联系不上;测量仪器的频率不稳,就会引起较大的测量误差;在载波电话中,载波频率不稳,将会引起话音失真。

1. 振荡器的频率稳定度

振荡器的频率稳定度指标是用频率稳定度来衡量的。频率稳定度有两种表示方法：

(1) 绝对频率稳定度

它是指在一定条件下实际振荡频率与标准频率的偏差 Δf ：

$$\Delta f = f_0 - f \quad (4-11)$$

(2) 相对频率稳定度

它是指在一定条件下，绝对频率稳定度与标准频率之间的比值：

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f}{f_0} \quad (4-12)$$

常用的是相对频率稳定度，简称频率稳定度。例如，一个振荡频率为 1MHz 的振荡器，实际工作在 0.99999MHz 上，它的相对频率稳定度 $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{10\text{Hz}}{1\text{MHz}} = \frac{10}{10^6} = 1 \times 10^{-5}$ 。 $\frac{\Delta f}{f_0}$ 越小，频率稳定度越高。上面所说的“一定条件”可以指一定的时间范围，或一定的温度，或电压变化范围。例如，在一定时间范围内的频率稳定度可以分为以下几种情况：

短期稳定度——1 小时内的相对频率稳定度，一般用来评价测量仪器和通信设备中主振器的频率稳定指标；

中期稳定度——1 天内的相对频率稳定度；

长期稳定度——数月或 1 年内的相对频率稳定度。

频率稳定度用 10 的负几次方表示，次方绝对值越大，稳定度越高。中波广播电台发射机的中期稳定度是 $2 \times 10^{-3}/\text{日}$ ；电视发射台是 $5 \times 10^{-7}/\text{日}$ ；一般 LC 振荡器是 $(10^{-3} \sim 10^{-4})/\text{日}$ ；克拉泼和西勒振荡器是 $(10^{-4} \sim 10^{-5})/\text{日}$ 。

2. 稳频措施

- (1) 减小温度的影响；
- (2) 稳定电源电压；
- (3) 减少负载的影响；
- (4) 晶体管与回路之间的连接采用松耦合；
- (5) 提高回路的品质因数 Q ；
- (6) 使振荡频率接近于回路的谐振频率；
- (7) 屏蔽、远离热源。

4.2.6 石英晶体振荡器

石英晶体振荡器就是以石英晶体谐振器取代 LC 振荡器中构成谐振回路的电感、电容元件所组成的正弦波振荡器，它的频率稳定度可达 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 数量级，所以得到极为广泛的应用。它之所以具有极高的频率稳定度，关键是采用了石英晶体这种具有高 Q 值的谐振元件。

由石英谐振器(石英晶体振子)构成的振荡电路通常叫“晶振电路”。从晶体在电路中

的作用来看分两类：一类是工作在晶体并联谐振频率附近，晶体等效为电感的情况，叫做“并联晶振电路”；另一类是工作在晶体串联谐振频率附近，晶体近于短路的情况，叫做“串联晶振电路”。

1. 并联晶振电路

这种电路由晶体与外接电容器或线圈构成并联谐振回路，按三点线路的连接原则组成振荡器，晶体等效为电感。在理论上可以构成三种类型的基本电路，但在实际应用中常用的是如图 4-8 所示的电路，称“皮尔斯”电路。这种电路不需外接线圈，而且频率稳定度较高。

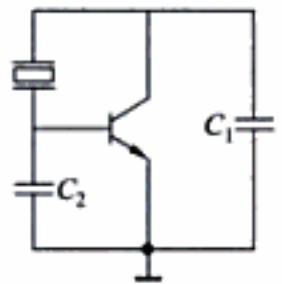


图 4-8 并联晶体振荡器原理电路图

图 4-9 给出了这种电路的实例。这里，晶体等效为电感，晶体与外接电容（包括 4.5/20pF 与 20pF 两个小电容）和 C_1, C_2 组成并联回路，其振荡频率应落在 f_p 与 f_s 之间。

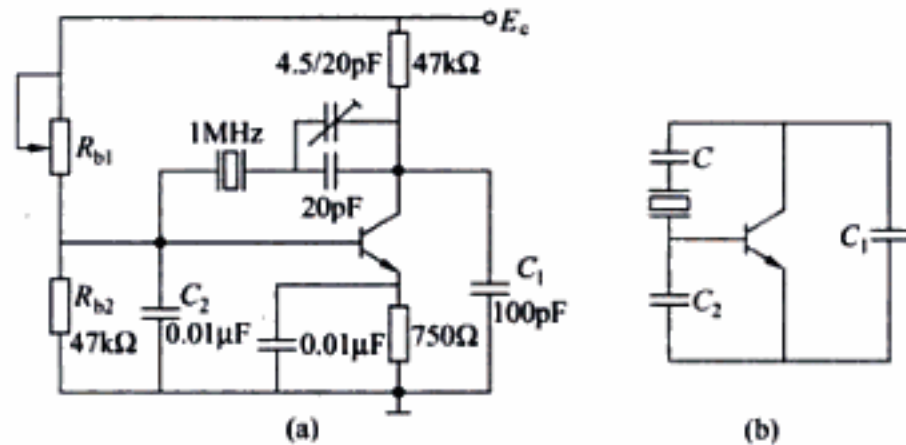


图 4-9 并联晶体振荡器实例

(1) 振荡频率 f_0 的确定

图 4-10 是图 4-9 中谐振回路的等效电路。

该谐振回路的电感就是 L_q ，而谐振回路的总电容应由 C_q, C_0 及外接电容 C, C_1, C_2 组合而成。 C_{Σ} 由下式确定：

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_0 + \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}} \quad (4-13)$$

选择电容时，要满足 $C \ll C_1, C \ll C_2$ 条件，可推得此时的振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_q(C_0 + C)}{C_q + C_0 + C}}} \quad (4-14)$$

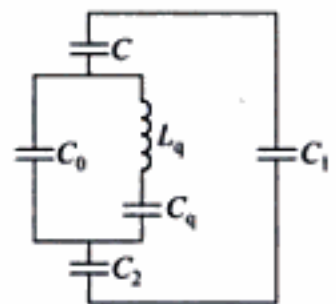


图 4-10 图 4-9 中谐振回路的等效电路

(2) f_0 总是处在 f_p 与 f_s 两频率之间

调节 C 可使 f_0 产生很微小的变动。无论怎样调节 C, f_0 总是处于晶体 f_p 与 f_s 的两频率之间。但是，只有在 f_p 附近，晶体才具有并联谐振回路的特点。

2. 串联型晶振电路

图 4-11(a) 给出了一个串联晶振电路实例, 它是按三点线路形式构成的, 它的交流等效电路如图 4-11(b) 所示。

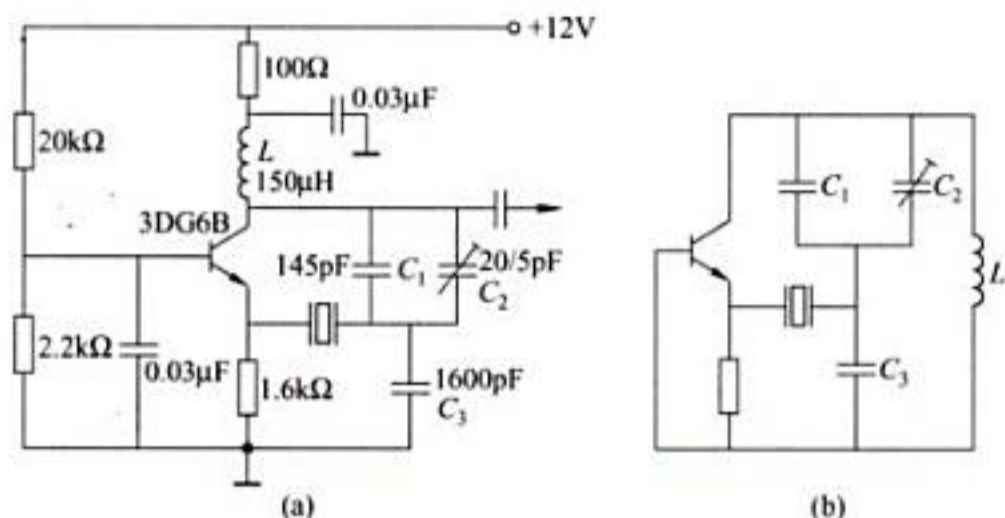


图 4-11 串联晶振实例

这种电路很类似于电容三点式振荡器。区别仅在于两个分压电容的抽头是经过石英谐振器接到晶体管发射极的, 由此构成正反馈通路。它的工作原理是: C_1 与 C_2 并联, 再与 C_3 串联, 然后与 L 组成并联谐振回路, 调谐在振荡频率。当振荡频率等于石英谐振器的串联谐振频率时, 晶体呈现纯电阻, 阻抗最小, 阻抗呈短路, 正反馈最强, 相移为零, 满足相位条件。因此振荡器的频率稳定度主要由石英谐振器来决定。在其他频率, 不能满足振荡条件。用图 4-11 电路中标出的元件数值, 可得到 1MHz 的振荡频率, 适当选取电路参数可使振荡频率高达几十兆赫。

3. 泛音晶振电路

石英谐振器的频率越高, 则要求晶片越薄, 机械强度越差, 用在电路中易于振碎。一般晶体频率不超过 30MHz。为了提高晶振电路的工作频率, 可使电路振荡频率工作在晶体的谐波(一般在 3 次到 7 次谐波)频率上, 这是一种特制的晶体, 叫做泛音晶体(例如 JA12 型)。这样就可利用几十兆赫基频的晶片产生上百兆赫的稳定振荡。

并联型泛音晶体振荡器如图 4-12 所示。它与皮尔斯振荡器的不同之处是用 L_1C_1 谐振回路代替了电容 C_1 , 而根据三点式振荡器的组成原则, 该谐振回路应该呈容性阻抗。假如要求晶体工作在 5 次泛音, 则调谐好的 L_1C_1 回路对 3 次泛音呈现感性阻抗, 不满足三点式电路的相位条件, 电路不能起振; 而对 5 次泛音, L_1C_1 回路又相当一电容, 即满足了起振的相位条件, 若又满足了振幅条件, 电路才可以振荡。

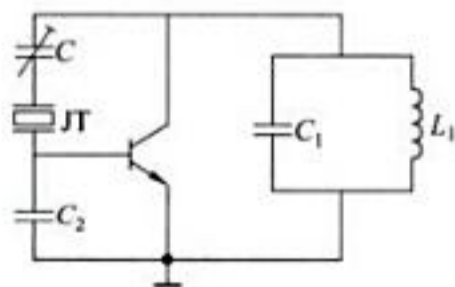


图 4-12 并联型泛音晶体振荡器

4.3 典型例题分析

例 4-1 考毕兹振荡电路如图 4-2 所示。给定回路参数 $C_1 = 36\text{pF}$, $C_2 = 680\text{pF}$, $L = 2.5\mu\text{H}$, $Q_0 = 100$, 晶体管参数 $R_s = 10\text{k}\Omega$, $R_i = 2\text{k}\Omega$, $C_o = 4.3\text{pF}$, $C_i = 36\text{pF}$ 。求: 振荡频率 f_0 、反馈系数 F 以及为满足起振所需的 β 最小值。

解 (1) 求 f_0

$$C'_1 = C_1 + C_o = 36 + 4.3 \approx 40\text{pF}$$

$$C'_2 = C_2 + C_i = 680 + 41 \approx 720\text{pF}$$

$$C = \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2} \approx 38\text{pF}$$

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.5 \times 38 \times 10^{-18}}} \approx 16.3\text{MHz}$$

(2) 求 F

$$F = \frac{C'_1}{C'_2} = \frac{40}{720} = \frac{1}{18}$$

(3) 求起振条件

先求出 R_o 和 n , 有

$$R_o = Q_0 \sqrt{\frac{L}{C}} = 100 \sqrt{\frac{2.5}{38} \times 10^6} = 100 \times 0.25 \times 10^3 = 25\text{k}\Omega$$

$$n = \frac{C'_2}{C'_1 + C'_2} \approx 1$$

根据起振条件可得

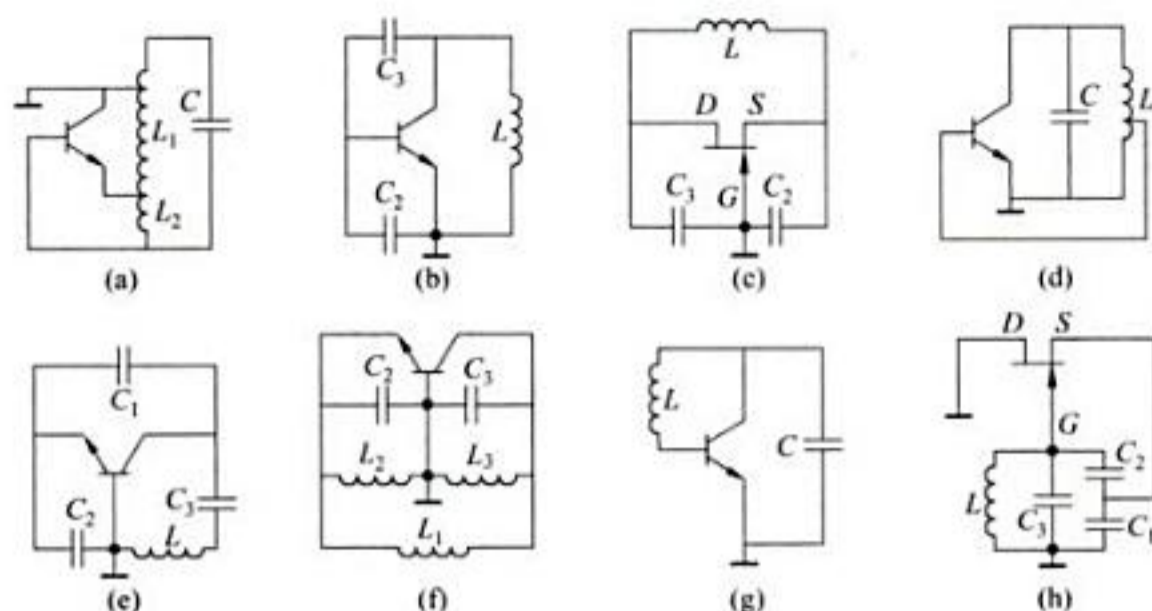
$$\beta > \frac{R_i}{F} \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{n^2 R_o} \right) + F = 2 \times 18 \times \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{25} \right) + \frac{1}{18} \approx 5$$

例 4-2 利用相位平衡条件的判断准则, 判断图例 4-2 中所示的三点式振荡器交流等效电路, 哪个是错误(不可能振荡)的? 哪个是正确(有可能振荡)的? 属于哪种类型的振荡电路? 有些电路应说明在什么条件下才能振荡?

解 分析思路——判断一个三点式 LC 振荡电路是否满足自激所需相位条件, 根本方法是考察 c, b, e 三个电极间电抗的符号关系, X_{cb} 与 X_{be} 应同号, 它们和 X_{ca} 反号。射同基(集)反。如果每两个电极之间只是一种性质的电抗, 能否满足自激所需相位条件, 只有两种可能: 要么满足, 要么不满足。如果两个电极之间不止一种性质的电抗时, 则两种电抗在一定数值条件下, 电路满足自激所需相位条件。

所以图(a), 图(e), 图(h)有可能相位满足平衡条件的判断准则——射同基(集)反, 有可能振荡。图(a)中的 X_{ca} 必须是容性; 图(e)中的 X_{ca} 必须是感性; 图(h)是场效应管振荡器, 对于场效应管振荡器, 将发射极对应场效应管的源极即可, 图中的 X_{cd} 必须是感性。

图(b), 图(c), 图(d)不可能振荡, 因为相位不满足平衡条件的判断准则——射同基(集)反。当 $L_2 C_2 < L_3 C_3$ 时, 图(f)有可能振荡; 计振荡器输入电容时, 图(g)有可能振荡。



图例 4-2

例 4-3 图示表示三回路振荡器的交流等效电路,假定有以下 6 种情况:

- (1) $L_1 C_1 > L_2 C_2 > L_3 C_3$ (2) $L_1 C_1 < L_2 C_2 < L_3 C_3$
 (3) $L_1 C_1 = L_2 C_2 = L_3 C_3$ (4) $L_1 C_1 = L_2 C_2 > L_3 C_3$
 (5) $L_1 C_1 < L_2 C_2 = L_3 C_3$ (6) $L_2 C_2 < L_3 C_3 < L_1 C_1$

试问哪几种情况可能振荡? 等效为哪种类型的振荡电路? 其振荡频率与各回路的固有谐振频率之间有什么关系?

解 分析思路——本题用三个并联谐振回路代替了基本回路中的三个电抗元件,判断时应注意:

① 同样应满足射同基(集)反的原则,要使得电路可能振荡,根据三点式振荡器的组成原则有: L_1, C_1 回路与 L_2, C_2 回路在振荡时呈现的电抗性质相同, L_3, C_3 回路与它们的电抗性质不同。

② 由于三个回路都是并联谐振回路,这就要通过回路的相频特性去判断。根据并联谐振回路的相频特性,该电路要能够振荡,三个回路的谐振频率必须满足 $f_{03} > \max(f_{01}, f_{02})$ 或 $f_{03} < \min(f_{01}, f_{02})$, 所以:

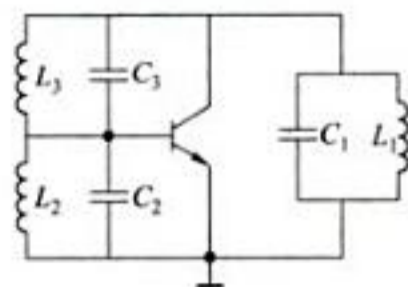
(1) $L_1 C_1 > L_2 C_2 > L_3 C_3$, 则 $f_{01} < f_{02} < f_{03}$, 故电路可能振荡。可能振荡的频率 f_1 为 $f_{02} < f_1 < f_{03}$, 等效为电容反馈的振荡器。

(2) $L_1 C_1 < L_2 C_2 < L_3 C_3$, 则 $f_{01} > f_{02} > f_{03}$, 故电路可能振荡。可能振荡的频率 f_1 为 $f_{02} > f_1 > f_{03}$, 等效为电感反馈的振荡器。

(3) $L_1 C_1 = L_2 C_2 = L_3 C_3$, 则 $f_1 = f_2 = f_3$, 故电路不可能振荡。

(4) $L_1 C_1 = L_2 C_2 > L_3 C_3$, $f_{01} = f_{02} < f_{03}$, 故电路可能振荡。可能振荡的频率 f_1 为 $f_{01} = f_{02} < f_1 < f_{03}$, 等效为电容反馈的振荡器。

(5) $L_1 C_1 < L_2 C_2 = L_3 C_3$, 同样分析可知电路不可能振荡。



图例 4-3

(6) $L_2 C_2 < L_3 C_3 < L_1 C_1$, 同样分析可知电路不可能振荡。

4.4 思考题与习题解答

4-1 为什么晶体管振荡器大都采用固定偏置与自偏置的混合偏置电路?

答 晶体管 LC 振荡器采用固定的正向偏置是为了使振荡类型为软激励, 无须在外加强的激励下就能起振, 也不致停振。而采用自生反偏置则可以稳幅。二者不结合的话, 不可能两个优点兼而有之。

4-2 为什么兆赫级以上的振荡器很少用 RC 振荡电路?

答 RC 振荡电路用 RC 选频网络, 而 RC 选频网络的选频特性很差。为了改变波形, RC 振荡器在加正反馈的同时, 还加有负反馈。而为了能在振荡频率的谐波获得深度负反馈, 要求放大器有高的增益。因为高增益的高频放大器成本高, 使振荡器的成本随之升高, 与相同指标的 RC 高频振荡电路相比, LC 振荡电路的成本低得多。故兆赫级以上的振荡器不宜采用 RC 振荡电路。

4-3 反馈型 LC 自激振荡器在起振后, 往往出现反向偏压, 试从理论上予以解释。

答 反馈型 LC 自激振荡器的小信号环反馈系数 K_F 值一般远大于 1, 起振后振幅迅速增长, 从而使器件进入强非线性区工作, 并必然会有一部分时间工作于截止区。这样, 器件电流的平均分量增大, 这一平均电流分量的电荷被偏置电路中的电容储存起来, 对偏置电阻放电, 产生反向偏压, 当自生反偏压超过外给正向偏压时, 总的偏压便是反向偏压。

4-4 确定晶体管振荡器中器件和振荡回路耦合时, 应从哪些方面考虑?

答 晶体管和振荡电路耦合太紧时, 晶体管参数的改变影响频率稳定度。若集电极与振荡回路耦合太松, 则集电极向回路看进去的视在阻抗很小, 放大量小; 基极—发射极与谐振回路的耦合太松, 则反馈量小。因此, 耦合过松可能不满足自激所需振幅条件。故耦合松紧应兼顾频率稳定与起振(自激所需振幅条件)两个方面。

4-5 为什么 LC 振荡器中的谐振放大器一般是工作在失谐状态? 它对振荡器的性能指标有何影响?

答 因为振荡所需相位条件是 K_F 的总相位移为 $2n\pi$, 一般反馈网络 F 总不可避免地有相移, 因此放大电路 K 必须产生一相反的相移, 以抵消 F 电路的相移, 这就使得放大器必须工作在失谐状态。工作在失谐状态下的放大器, 放大量减小, 器件损耗增大。前者使器件的最高振荡频率下降, 后者使振荡器的输出功率减小。

4-6 LC 振荡器的振幅不稳定, 是否会影响频率稳定? 为什么?

答 会影响频率稳定。因为晶体管的结电容均为非线性电容, 振荡器的振幅不稳定, 改变其直流工作状态, 并改变加到结电容上的电压, 使结电容的容量发生变化, 导致振荡频率变化。

4-7 作高频炉用的大功率振荡器, 当调整电路, 使负载电阻等于器件的输出电阻时, 是否能获得大功率输出? 并说明理由。

答 不能获得最大的功率输出。因为当负载电阻等于器件的输出电阻时, 器件的电流动态范围很小。

4-8 图 4-2 所示的电容反馈振荡器, 电路中 $C_1 = 100\text{pF}$, $C_2 = 300\text{pF}$, $L = 50\mu\text{H}$, 求该电路的振荡频率和维持振荡所必需的最小放大倍数 K_{\min} 。

答 $f_0 = 2.6\text{MHz}$, $K_{\min} = 3$ 。

4-9 利用相位平衡条件的判断准则, 判断图例 4-2 中所示的三点式振荡器交流等效电路, 哪个是错误的(不可能振荡)? 哪个是正确的(有可能振荡)? 属于哪种类型的振荡电路? 有些电路应说明在什么条件下才能振荡?

解 详见本章典型例题 4-2 分析。

4-10 图例 4-3 表示三回路振荡器的交流等效电路, 假定有以下 6 种情况

- (1) $L_1 C_1 > L_2 C_2 > L_3 C_3$ (2) $L_1 C_1 < L_2 C_2 < L_3 C_3$
 (3) $L_1 C_1 = L_2 C_2 = L_3 C_3$ (4) $L_1 C_1 = L_2 C_2 > L_3 C_3$
 (5) $L_1 C_1 < L_2 C_2 = L_3 C_3$ (6) $L_2 C_2 < L_3 C_3 < L_1 C_1$

试问哪几种情况可能振荡? 等效为哪种类型的振荡电路? 其振荡频率与各回路的固有谐振频率之间有什么关系?

解 详见本章典型例题 4-3 分析。

4-11 图题 4-11 是哈特莱振荡器的改进电路原理图。

- (1) 试根据相位判别规则说明它可能产生振荡;
 (2) 画出它的实际电路。

答 (1) 可能产生振荡。相位满足平衡条件的判断准则——射同基(集)反, 有可能振荡; 图中的 X_{c3} 必须是容性。

(2) 实际电路见图题 4-11。

4-12 以克拉泼振荡器为例说明改进型电容三点式电路为什么可以提高频率稳定度?

答 它的特点是把基本型的电容反馈三点线路集电极—基极支路的电感改用 LC 串联回路代替, 这正是它的名称的由来——串联改进型电容反馈三点线路, 又叫克拉泼电路。

这种振荡器的频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Sigma}}}$$

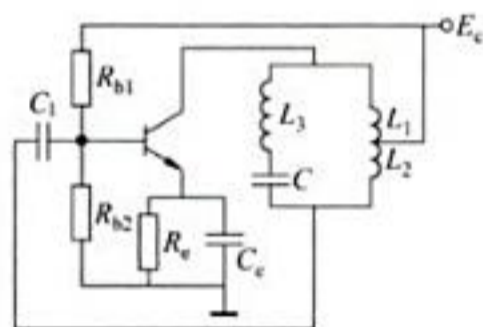
其中 C_{Σ} 由下式决定:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1 + C_0} + \frac{1}{C_2 + C_1}$$

选 $C_1 \gg C, C_2 \gg C$ 时, $C_{\Sigma} \approx C$, 振荡频率 ω_0 可近似写成

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

这就使 C_0 和 C_1 几乎与 ω_0 值无关, 它们的变动对振荡频率的稳定性就没有什么影响了, 提高了频率稳定度。



图题 4-11

4-13 画出并联改进型电容反馈三点式振荡电路图(西勒电路),写出其振荡频率表达式,并说明这种电路为什么在波段范围内幅度比较平稳?

答 (1) 电路图见图 4-6。

(2) 振荡频率表达式为

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC_{\Sigma}}}$$

其中,回路总电容 C_{Σ} 为

$$C_{\Sigma} = C + \frac{1}{\frac{1}{C_1 + C_0} + \frac{1}{C_2 + C_1} + \frac{1}{C_3}}$$

(3)

$$\begin{aligned} n &= \frac{C_3 C_2'}{C_3 + C_2'} / \left(C_1' + \frac{C_3 C_2'}{C_3 + C_2'} \right) \\ &= 1 / \left[1 + \frac{C_1 (C_3 + C_2')}{C_3 C_2'} \right] \\ &= 1 / \left[1 + \frac{(C_1 + C_0)(C_3 + C_2 + C_1)}{C_3 (C_2 + C_1)} \right] \end{aligned}$$

由上式可知, n 和 C 无关,当调节 C 来改变振荡频率时, n 不变。如果把 R 折合到 $c-e$ 端, R' 表示为

$$R' = n^2 R = n^2 Q \omega_0 L$$

当改变 C 时, n, L, Q 都是常数,则 R' 仅随 ω_0 一次方增长,易于起振,振荡幅度增加,使在波段范围内幅度比较平稳,频率覆盖系数较大,可达 1.6~1.8。

4-14 试从工作频率范围、器件的工作状态、改善输出波形的措施、对放大器的要求等几个方面比较 LC 正弦波振荡器和 RC 正弦波振荡器的不同点,并对为什么产生这些不同点作简要的说明。

答 (1) 工作频率范围

RC 振荡器适用于低频, LC 振荡器适用于高频,因频率低时要求 LC 值大, LC 值大时将导致选频网络体积大而且笨重,频率低时要求 R 阻值大并不导致体积和重量的增大,但高质量的 RC 振荡器要求高增益的放大器,其原因是 RC 网络的选频特性差。 LC 振荡器由于 LC 网络选频特性好,不要求高增益放大器,而高频的高增益放大器造价高,故 RC 振荡器不适用高频。

(2) 器件的工作状态

LC 振荡器中的器件工作于强非线性状态,以便采用自生反向偏压稳幅。在强非线性区工作所产生的谐波可以依靠 LC 选频网络滤除。 RC 振荡器中的器件必须工作于线性区,以保证振荡波形良好,否则,由于 RC 选频网络的选频特性差难以保证振荡波形良好。

(3) 改善输出波形的措施

LC 振荡器中依靠提高 LC 振荡回路的 Q 值来改善波形, RC 振荡器采用深度负反馈

减小谐波。

(4) 对放大器增益的要求

RC 振荡器中要求高增益的放大器,为深度负反馈创造条件。

(5) 稳幅措施

LC 振荡器用自生反偏压稳幅。RC 振荡器由于前述原因,不允许器件工作于强非线性区而不能采用自生反偏压稳幅,于是采用非线性惰性反馈稳幅。

4-15 泛音晶体振荡器的电路构成有什么特点?

答 泛音晶体振荡器电路必须有能抑制基频和低次泛音振荡的电路。通常用一个谐振回路代替一个电抗元件。在低于所需振荡频率时,该谐振回路呈现的电抗改变符号,不满足起振所需的相位条件;而在高于所需振荡频率时,虽然满足起振相位条件,但是高次泛音将因放大倍数小,振幅条件不满足而被抑制。

4-16 用石英晶体稳频,如何保证振荡一定由石英晶体控制?

答 用石英晶体稳频的振荡器,有两种电路:一种是并联式,石英晶体工作于感性电抗区,一旦石英晶体停止工作,其等效电抗为支架电容呈现的容抗,电路立刻停振;另一种是串联式,石英晶体接在正反馈电路中,工作于串联谐振频率,一旦石英晶体停止工作,其支架电容呈现的容抗使正反馈减小,电路立刻停振。

4.5 自测题

1. 填空题

- (1) 正弦波振荡器由_____、_____和_____三部分组成。
- (2) 石英晶体稳定频率的原因有_____。
- (3) 电感三点式振荡器的特点是_____起振(填“容易”或“不易”),输出电压幅度_____ (填“大”或“小”),频率调节_____ (填“方便”或“不方便”)。
- (4) 电容三点式振荡器的特点是振荡波形_____ (填“好”或“不好”),振荡频率_____ (填“高”或“低”),频率调节_____ (填“方便”或“不方便”)。
- (5) 晶体振荡器和泛音振荡器的振荡频率相比,_____振荡器振荡频率高。
- (6) 根据石英晶体的电抗特性,当 $f=f_0$ 时,石英晶体呈_____性;当 $f_0 < f < f_p$ 时,石英晶体呈_____性;当 $f < f_0$ 或 $f > f_p$ 时,石英晶体呈_____性。
- (7) LC 振荡器起振时要有大的放大倍数,应工作于_____类状态,进入稳定状态时,为了使稳频效果好,应工作于_____状态。
- (8) 使用石英振荡器,是利用石英的_____特性。
- (9) 要产生频率较高的正弦波信号应采用_____振荡器,要产生频率较低的正弦波信号应采用_____振荡器,要产生频率稳定度高的正弦信号应采用_____振荡器。
- (10) 克拉泼振荡器频率稳定度比普通的电容三点式振荡器频率稳定度高的原因是_____。

2. 判断题

(1) 某一电子设备中,要求振荡电路的频率为 20MHz,且频率稳定度高达 10^{-8} ,应采用 LC 振荡器。

(2) LC 正弦波振荡器提高频率稳定度的措施是降低回路的 Q 值和使晶体管与回路处于紧耦合。

(3) 设计一个稳定度高的频率可调振荡器(通常采用晶体振荡器)。